

文章编号:1001-5078(2024)10-1619-07

· 光学技术 ·

基于近红外成像的舱内摄像头补光技术

丁金延

(富赛汽车电子有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要:汽车舱内摄像头 DMS 和 OMS 是对车内人员的精神状态、生命特征、肢体表达等进行识别的,为了保证算法识别的成功率,对图像中人脸或肢体的亮度有一定要求。针对近红外成像需要主动光源补光的特点,提出了一种汽车舱内摄像头近红外补光的技术方案,依据红外辐射光源空间通量分布、人体表皮的近红外特征、几何光学的折反射规律、Sensor 的光电转换能力等方面的理论,建立计算模型,推导出补光 LED 的功率与图像中人脸亮度 DN 值之间的关系公式。在数据模型中通过该公式推算应用 5.2 W 近红外补光 LED 对人脸进行补光后,图像中所拍摄的人脸的亮度 DN 值进行模拟计算。同时搭建了舱内摄像头的验证系统,通过对试验车内人员实际补光后拍摄图像数据进行亮度 DN 值分析,并与理论推算结果进行对比,实验结果与计算结果误差小于 $\pm 5\%$,满足算法要求,验证了舱内摄像头近红外补光的技术方案的可行性。

关键词:近红外成像;近红外补光;图像人脸亮度;舱内摄像头;DMS;OMS

中图分类号:TN219;TP391.41 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.10.017

Light filling technology of cabin camera based on near infrared imaging

DING Jin-yan

(Fulscience Automotive Electronics Co., Ltd., Changchun 130000, China)

Abstract:The camera DMS and OMS in the car cabin identify the mental state, vital characteristics, and body expression of the occupants. In order to ensure the success rate of the algorithm recognition, there are certain requirements for the brightness of the face or body in the image. In view of the feature of near infrared imaging requiring active light source, a technical scheme of near infrared light supplement for the camera in the car cabin is proposed. A calculation model is established based on the theories of spatial flux distribution of infrared radiation source, near infrared characteristics of human skin, refractive and reflective law of geometric optics, photoelectric conversion ability of Sensor, etc. The relationship formula between the power of the fill light LED and the face brightness DN value in the image is derived. In the data model, the formula is used to calculate the luminance DN value of the face captured in the image after the 5.2 W near infrared supplementary light LED is used to fill the light. At the same time, a verification system is set up for the camera inside the cabin. Through the analysis of the brightness DN value of the image data taken by the test vehicle after the actual light filling, and the comparison with the theoretical calculation results, the error between the experimental results and the calculated results is less than $\pm 5\%$, which meets the algorithm requirements, and verifies the feasibility of the technical scheme of near infrared light filling for the camera inside the cabin.

Keywords:near infrared imaging;near-infrared fill light;image face brightness;cabin camera;DMS;OMS

作者简介:丁金延(1989-),本科,高级工程师,从事航天、汽车等方面的光机结构设计工作。E-mail:494492045@qq.com。

收稿日期:2024-01-29;修订日期:2024-03-20

1 引言

随着智能汽车无人驾驶技术的成熟,汽车用摄像头在辅助驾驶和无人驾驶技术上,也有着重要的地位^[1]。在汽车用摄像头中,舱内摄像头是辅助驾驶传感器中的重要角色^[2],舱内摄像头分为驾驶员状态监控系统 DMS(Driver Monitoring System)和车内乘员监控系统 OMS(Occupancy Monitoring System)两种主流类型的摄像头,用于对驾驶员和车内乘员的表情、状态、手势以及车内物体等进行监控,并通过图像算法进行识别。

众所周知,电磁波根据波长的不同,可分为射线、紫外、可见光、近红外、中红外、远红外以及波长更长的无线电。由于舱内监控场景会存在光线较暗的情景,所以需要补光灯对舱内物体进行补光,用人眼能响应的可见光补光会干扰驾驶员,造成安全隐患,同时也会影响乘员的乘坐舒适性体验;大气中水蒸气和二氧化碳等气体分子对中波红外的吸收性很强,且中波红外容易受空气中粒子的干扰而发生散射,导致成像模糊;长波红外是被动成像原理,不需要主动光源补光,但长波红外是热感成像,无法反映特征的细节。近红外处于可见光和中红外之间,波长范围是 $0.78 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 。近红外成像在抑制环境光照影响的同时,也不易受到环境空气和温度的影响^[3]。DMS 摄像头主要采用 860 nm 或 940 nm 的近红外成像,而 OMS 则主要采用可见光($380 \sim 780 \text{ nm}$)和 860 nm (或 940 nm)的 RGB + IR 的成像机制^[4]。由于近红外 CMOS 成像器件(下文简称 Sensor)的灵敏度较低,近红外成像必须有主动光源对人脸、肢体或者物体进行补光后,才可形成图像算法可识别的近红外图像^[1,5],因此主动补光光源的辐射能力成为了近红外摄像头设计的关键。

结合补光光源(近红外 LED,一下简称 IR-LED)的功率、IR-LED 的辐射强度角度特性曲线、人体皮肤对近红外光的反射能力、镜头成像能力、Sensor 的光电转换效率等因素,对 IR-LED 补光功率大小与图像人脸亮度(人脸 DN 值)的对应关系进行了研究,并通过摄像头对研究结果进行了有效的验证^[6]。

2 DMS/OMS 摄像头的构成

目前主流的舱内监控摄像头均在摄像头上配备了 IR-LED 对驾驶员和乘员进行补光照明,并且将

IR-LED 与摄像头集成在一体,以某款 OMS 摄像头为例,其结构如图 1 所示。IR-LED 与摄像头集成在一体,IR-LED 发射的近红外光照射到人体或物体后,在人体或物体表面形成漫反射光,人体或物体由此变亮,摄像头镜头对照亮后人脸进行拍摄,形成较亮的人脸图像。未增加补光与增加补光 IR-LED 后的图像效果如图 2 所示。

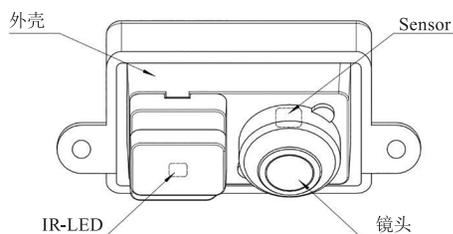


图 1 OMS 摄像头构成

Fig. 1 OMS camera configuration



图 2 未补光与补光后图像

Fig. 2 Images without and after light filling

3 人体皮肤的近红外特性

由于舱内摄像头主要对表情、手势、眼球等进行识别,进而为辅助驾驶输入判断条件,需要对人体面部、手、臂等肢体部位进行有效成像,那么人脸亮度、手臂亮度是否符合图像算法要求就成为了关键。因此人体皮肤对近红外光的特性我们必须加以分析。

人体皮肤是由角质层、表皮层、真皮层和皮下组织组成,皮下组织又分为脂肪层和肌肉层。各层组织的光学参数:折射率 n 、吸收系数 μ_a 、散射系数 μ_s 和各向异性因子 g 的计算参数如表 1 所示^[6]。

表 1 皮肤组织的四层结构模型参数表^[7]

Tab. 1 Parameters of the four-layer structure model of skin tissue^[7]

参数	n	μ_a/cm^{-1}	μ_s/cm^{-1}	g	d
表皮层	1.55	35.0	480	0.79	0.0085
真皮层	1.55	2.7	187	0.81	0.1550
脂肪层	1.45	0.2	20	0.80	0.5000
肌肉层	1.37	11.2	530	0.85	2.0000

当光照射到人体皮肤组织后,皮肤组织会对光产生镜反射、漫反射、吸收和穿透,可将光在皮肤组

织上产生的各个状态通过图3进行表示。

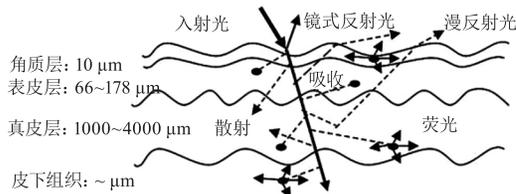


图3 光在皮肤组织内外传输示意图^[7]

Fig.3 Schematic diagram of light transmission inside and outside skin tissue^[7]

在舱内摄像头成像的模型中,皮肤对光的产生漫反射光是我们最终关系图像成像后人脸亮度的因素,由此,我们对光在皮肤表面产生的漫反射光的反射率进行计算^[8],得到不同波段的光在皮肤上的反射率,如图4所示。由于舱内摄像头使用的是860 nm或940 nm波段的近红外光^[9],因此人脸在该波段下的反射率近似为50%。

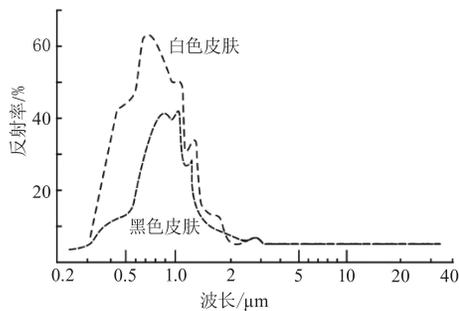


图4 皮肤反射率和光波波长的关系

Fig.4 Relationship between skin reflectance and wavelength of light

4 补光和成像过程模型

对人脸的近红外光的反射率特性进行计算后,得到人脸的近红外反射率值,那么舱内摄像头在整个成像的过程模型即可建立。

4.1 近红外补光到成像过程的机理

IR-LED以其固定的发射角度发射出近红外光辐射至人脸,通过人脸皮肤的反射形成反射光,反射光主要包括镜面反射和漫反射,在成像过程中起主要作用的是漫反射光。此时人脸已变成二次光源对摄像头形成辐射。人脸的漫反射光被镜头收入,并在镜头焦面处形成光学图像。在镜头焦面处设置Sensor,则光学图像即成像在Sensor的感光面上。Sensor感光面将光子转换为电荷,并通过电荷累积和释放形成模拟信号,并通过AD转换为数字信号,最终形成人脸图像。近红外补光到成像过程的模型

如图5所示。

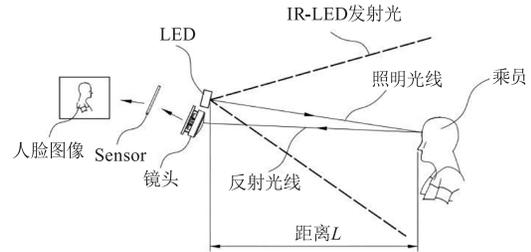


图5 补光到成像过程模型

Fig.5 Fill light to imaging process model

4.2 摄像头各部件参数

本次举例的OMS摄像头,采用940 nm的IR-LED进行补光,IR-LED的峰值波长为 (940 ± 2) nm,IR-LED的额定功率为5.2 W,具体参数如表2所示,其辐射强度角度特性曲线如图6所示。OMS镜头为弘景光电的HJ6137L02镜头,其规格参数如表3所示。Sensor采用豪威的OV2312型号的Sensor,其规格参数如表4所示。

表2 IR-LED参数表

Tab.2 IR-LED parameters table

参数项	值
质心波长/nm	940
最大功率/W	5.2
发光效率/%	25.77
发射角/(°)	150

表3 镜头参数表

Tab.3 Lens parameters table

参数项	规格	值
HFOV	视场角/(°)	133.12 ± 3
VFOV		108.46 ± 3
MIC	最大成像圆直径/mm	Φ6.7
τ	总透过率	0.904

表4 Sensor参数表

Tab.4 Sensor parameters table

参数项	规格	值
Pixel	像素点尺寸	3 μm × 3 μm
Active Size	像素大小	1600 × 1300
Sensitivity	灵敏度	114 ke ⁻ /(μW · cm ⁻² · sec)@850 nm
		54 ke ⁻ /(μW · cm ⁻² · sec)@940 nm
Conversion Facto	换算系数	0.1551 DN/e ⁻

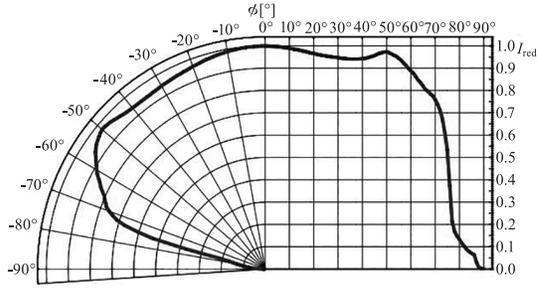


图 6 IR-LED 辐射强度角度特性曲线

Fig. 6 IR-LED radiation intensity angle characteristic curve

4.3 补光到成像过程的分析计算

IR-LED 功率 P , 发光效率 η , 辐射角度 θ , 辐射强度角度效率 δ 按照 IR-LED 辐射强度角度特性曲线中角度与辐射强度关系取值, 以乘员位置中心与 IR-LED 辐射面法线夹角为 0° 为示例进行计算。如图 7 所示。

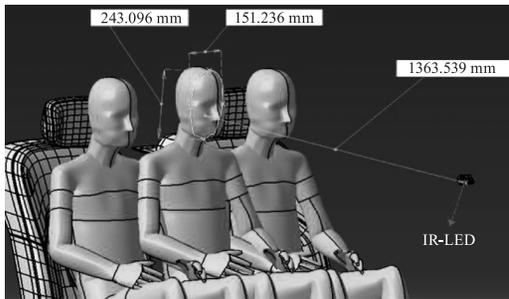


图 7 IR-LED 与乘员的位置关系

Fig. 7 Position relationship between IR-LED and occupant

人脸宽度为 151.2 mm, 人脸距离 IR-LED 为 1363.5 mm。IR-LED 辐射强度角度 θ , 通过 IR-LED 辐射强度角度曲线进行积分, 求得照明在人脸上的辐射通量 Φ_L :

$$\Phi_L = 2\eta \int_0^{3.17^\circ} P(\theta) d\theta \quad (1)$$

由于人体皮肤对近红外光有反射性能, 光照射在人体皮肤上形成漫反射光, 此时人脸相当于朗伯体光源对 OMS 摄像头形成辐射。OMS 摄像头通过镜头, 将人脸反射光进行收集并形成光学图像, 镜头收集的人脸的辐射光的通量 Φ_R 的计算方法:

$$\Phi_R = \frac{\Phi_L \times \rho}{2\pi} \times \frac{a^2}{L^2} \quad (2)$$

其中, ρ 为脸对光的反射率, 为 50%; L 为脸与摄像头之间的距离; a 为脸宽度。

人脸辐射通量 Φ_R 与镜头在焦面处形成的光学图像通量是对等关系。

镜头的光学图像形成在 Sensor 的像元上, 由于

Sensor 的像元为光敏材料, 可将光子转换为电子, 在内部形成电荷, 通过对电荷的累计和释放形成电压信号, 进而输出模拟信号, 并通过 AD 转换为数字量信号, 最终形成原始图像数据。图像算法对表情、手势进行识别也是通过原始图像数据进行算法处理的, 在原始图像数据中人脸亮度值通过 DN 来表示, $DN=0$ 时亮度为 0, $DN=255$ 时亮度为 100%。

在上述整个转换过程中, 是通过光学图像最终转换为 DN 值的过程, 因此光学图像 Φ_R 与 DN 值之间就存在对应关系。图像人脸亮度 DN 值与镜头的光学图像通量之间的计算方法归结为:

$$DN = \frac{\Phi_R \times S_{en} \times C_f \times A}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (3)$$

式中, S_{en} 为 Sensor 的灵敏度; C_f 为 Sensor 的换算系数; A 为脸占 Sensor 的像素面积; D 为镜头的光斑直径。

IR-LED 功率 $P=5.2$ W, 发光效率 $\eta=25.77\%$, 辐射角度 $\theta=150^\circ$, 结合公式 1 和图 6 的 IR-LED 辐射强度角度曲线计算可得到 $\Phi_L=60.68$ mW。

由图 7 可知, 人脸宽度 $a=151.2$ mm, 人脸到 IR-LED 距离 $L=1363.5$ mm, 人脸反射率 $\rho=0.5$, 根据式(2)求得人脸辐射通量 $\Phi_R=59.4$ μ W。

根据镜头、Sensor 等器件参数可知, Sensor 的灵敏度 $S_{en}=54$ ke⁻¹/(μ W \cdot cm⁻² \cdot sec), Sensor 的换算系数 $C_f=0.1551$ DN/e⁻, Sensor 的像元尺寸 3μ m \times 3μ m, 通过模型测得人脸占像元的面积 $A=1.278 \times 10^{-3}$ cm², 镜头光斑直径 $D=\Phi 6.7$ mm。

由式(3)可计算得出 $DN=90.2$ 。

本研究同样适用于主驾驶、副驾驶、主驾驶后排、副驾驶后排人员人脸亮度 DN 值的计算, 计算结果见表 5。

表 5 舱内各个位置 DN 计算结果Tab. 5 Calculation results of DN for each position in the cabin

乘员位置	DN
主驾驶	178.4
副驾驶	155.1
主驾驶后排	86.7
副驾驶后排	87.3
后排中间	90.2

5 实验与结果分析

为验证本次研究方法是否有效,与真实图像中人脸亮度之间是否存在偏差,我们通过某车型进行验证,本车型后排乘员距离与计算模型中一致,OMS摄像头安装在模型中的设计位置,调至IR模式,点亮IR-LED,对后排乘员以及驾驶员进行拍照,并对图片中后排乘员人脸亮度和驾驶员人脸亮度分别进行DN值分析,如图8、图9、图10、图11、图12所示。



图8 主驾驶人脸 DN
Fig.8 Face DN of main driver

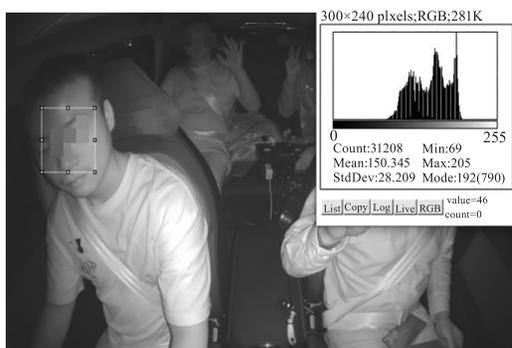


图9 副驾驶人脸 DN
Fig.9 Face DN of the co-pilot



图10 主驾驶后排人脸 DN
Fig.10 Face DN in the back row of the main driver

分析结果显示,后排乘员人脸亮度 DN = 94.23,驾驶员人脸亮度 DN = 180.33。此外,本计算方法不受车型限制,对乘用车的轿车、SUV 和

MPV 等车型均通用。为了验证方案的准确性,对三种车型不同安装位置的 OMS 进行推算,得出的 DN 值对比,如图 13、图 14、图 15 所示,误差值见表 6、表 7、表 8。

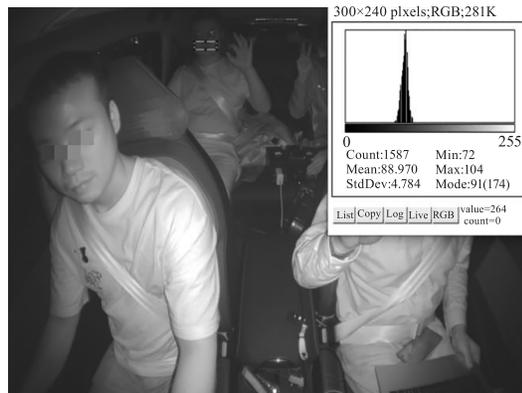


图11 副驾驶后排人脸 DN
Fig.11 Face DN of the back row of the co-pilot



图12 后排中间人脸 DN
Fig.12 Face DN in the middle of the back row

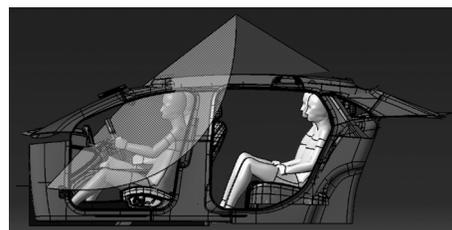


图13 车型一
Fig.13 Model one

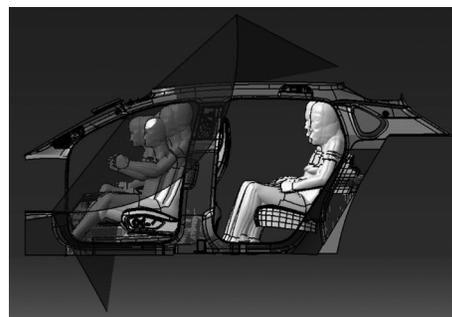


图14 车型二
Fig.14 Model two

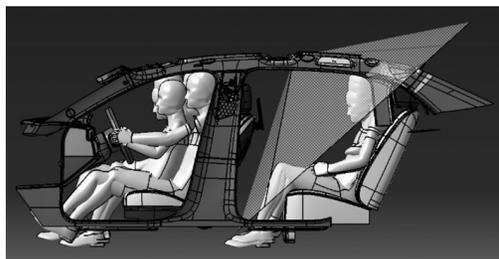


图15 车型三

Fig. 15 Model three

表6 车型一的计算DN与测试DN对比表

Tab. 6 Comparison table of calculated DN and test DN

乘员位置	计算 DN	实测 DN	误差/%
主驾驶	178.4	180.3	-1.05
副驾驶	155.1	150.3	3.2
主驾驶后排	86.7	85.6	1.29
副驾驶后排	87.3	89	-1.91
后排中间	90.2	94.2	-4.25

表7 车型二的计算DN与测试DN对比表

Tab. 7 Comparison table of calculated DN and test DN

乘员位置	计算 DN	实测 DN	误差/%
主驾驶	173.0	175.9	-1.68
副驾驶	151.6	149.8	1.19
主驾驶后排	86.5	85.3	1.39
副驾驶后排	79.8	80.1	-0.38
后排中间	99.5	103.2	-3.72

表8 车型三的计算DN与测试DN对比表

Tab. 8 Comparison table of calculated DN and test DN

乘员位置	计算 DN	实测 DN	误差/%
主驾驶后排	163.2	161.9	0.797
副驾驶后排	150.7	144.8	3.92
后排中间	165.1	168.7	-2.18

通过实际测量与计算结果比对,计算误差在 $\pm 5\%$ 以内,在舱内监控摄像头的设计过程中,本研究的计算方法对设计具有极大地帮助,可有效降低IR-LED补光不足的设计风险。

6 结论

结合辐射度学和近红外 Sensor 的特性,提出

了一种近红外技术的舱内摄像头补光技术的方法,通过对车载舱内摄像头补光和成像的模型进行建立和分析,提取补光与成像过程中各个环节参数,并建立了人体皮肤对红外光的反射特性,通过光源辐射、人体皮肤组织对近红外的反射、镜头光学成像、Sensor 光电转换,最终确立了主动补光源功率大小与图像人脸亮度进行匹配设计计算的方法。建立了真实舱内环境,对设计结果进行实验验证,通过对真实图像中人脸亮度的分析,与设计计算值进行对比。对比数据显示,设计计算与实测值极为相近,且设计误差较小,符合舱内产品的研发设计要求。基于近红外成像技术的舱内摄像头补光技术为舱内近红外成像摄像头产品的设计提供了一种新思路。

参考文献:

- [1] Huang Jianyuan, Zhao Xinrong, Zhang Changshun, et al. Research on a finger vein image capturing method and its apparatus based on CMOS imaging device [J]. Laser & Infrared, 2009, 31(1): 51-56. (in Chinese)
黄建元, 赵新荣, 张长顺, 等. 基于 CMOS 成像器件的手指静脉图像采集方法及装置 [J]. 红外技术, 2009, 31(1): 51-56.
- [2] QC/T 1128—2019, 汽车用摄像头 [S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部.
- [3] Yu Hongbing, Qiao Ya. Active near-infrared face recognition method based on kernel DCV algorithm [J]. Infrared Technology, 2014, 36(10): 807-811. (in Chinese)
俞红兵, 乔亚. 基于核 DCV 算法的主动近红外人脸识别方法 [J]. 红外技术, 2014, 36(10): 807-811.
- [4] GB/T 38892-2020, 车载视频行驶记录系统 [S]. 北京: 国家市场监督管理总局国家标准化管理委员会.
- [5] Zhang Baolong, Du Kangxi, Liu Xiaofan, et al. Study on the influence of road monitoring fill light on young drivers' driving safety at night [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(6): 109-116. (in Chinese)
张宝龙, 杜康熙, 刘小凡, 等. 全天候车载驾驶员监控系统相机设计 [J]. 电子测量与仪器, 2021, 35(6): 109-116.
- [6] Zhu Huasheng, Xu Chenguang. Facial image super-resolution reconstruction based on local constraint [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(2): 217-221. (in Chinese)
朱华生, 徐晨光. 基于局部约束的人脸图像超分辨率

- 重构算法[J]. 激光与红外, 2014, 44(2): 217 - 221.
- [7] Li Zhongming, Liu Xiaohua. Effects of optical parameters of skin tissue on diffuse reflectance, absorption ratio and light energy flux[J]. Journal Xianning College, 2010, 30(12): 1 - 5. (in Chinese)
李忠明, 刘晓花. 皮肤组织光学参数的变化对漫反射率、吸收比和光能流率的影响[J]. 咸宁学院学报, 2010, 30(12): 1 - 5.
- [8] Wang Lu, Zhang Wentao. Study on imageacquisitionsystem for human palm vein[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(4): 404 - 408. (in Chinese)
王璐, 张文涛. 人体手掌静脉图像采集系统研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(4): 404 - 408.
- [9] Xü Lili, Liu Lei. Application of wavefront control in the laser dermatology [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(7): 711 - 714. (in Chinese)
许莉莉, 刘磊. 波前控制技术在激光照射皮肤组织中的应用[J]. 激光与红外, 2014, 44(7): 711 - 714.